

Розробка моделей оцінки безвідмовності водія в транспортній системі з урахуванням заторів руху

Н. У. Гюльєв, В. В. Воронько, С. А. Осташевский, Д. П. Понкратов,
С. В. Псьол, І. С. Бугайов

Розглядається задача визначення безвідмовності водія в транспортній системі міста з урахуванням заторів. Перебування водія в заторах призводить до зростання його психоемоційної напруженості, підвищенню рівня втоми і, як наслідок, до зниження безвідмовності. Рівень безвідмовності водія безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху. Безвідмовність водія на елементах транспортної системи визначена ймовірністю скоєння дорожньо-транспортної пригоди, яка залежить не тільки від параметрів мережі і транспортних потоків, а насамперед й від часу реакції водія.

Розроблено моделі оцінки безвідмовності водія на ділянках транспортної мережі і в транспортних вузлах з урахуванням заторів руху, які дозволяють оцінити ймовірність скоєння дорожньо-транспортної пригоди для середньостатистичного водія. У цих моделях вплив затору враховується зміною часу реакції водія, яка є функцією зміни рівня його стомлення.

Для визначення у скільки разів ймовірність скоєння дорожньо-транспортної пригоди середньостатистичного водія на ділянках транспортної мережі і в транспортних вузлах з затором вище ніж ця ж ймовірність на тих же елементах транспортної системи без затору, було розглянуто співвідношення цих ймовірностей.

Визначено адекватність моделей шляхом співставлення відношення ймовірностей скоєння дорожньо-транспортної пригоди з затором на ділянках транспортної мережі і без нього до відповідного відношення кількості дорожньо-транспортних пригод на цих же ділянках транспортної мережі та на перехрестях.

Розроблені моделі оцінки безвідмовності водія на елементах транспортної мережі з урахуванням транспортних заторів дозволяють порівняти і оцінити різні варіанти проектних рішень з підвищення безпеки дорожнього руху

Ключові слова: безвідмовність водія, дорожньо-транспортна пригода, транспортна система, дорожній затор, час реакції

1. Вступ

Ефективність і надійність діяльності водія в транспортній системі значною мірою залежить від конкретних умов праці, у які потрапляє водій. Ці умови визначаються параметрами транспортного процесу, які склалися в конкретних ситуаціях. Однією з таких ситуацій є затор, який виникає через перевищення інтенсивності дорожнього руху над пропускнуою здатністю вулиць і доріг. Перебування в транспортному заторі чинить негативний вплив на психофізіологію

водія, призводить до підвищення рівня його стомлення, зростання часу реакції і до підвищення ймовірності скоєння дорожньо-транспортної пригоди (ДТП) після виходу із затору [1, 2].

У цих умовах безпека дорожнього руху в транспортній системі в значній мірі залежить від надійності водія, як основної ланки цієї системи.

Надійність водія – це властивість зберігати параметри функціонування в межах, що забезпечують безпеку руху і відповідних режимів руху і умов використання автомобіля [3]. Надійність водія – складна властивість, що визначається більш простими: безвідмовністю, відновлюваністю, збереженням, довговічністю. Безвідмовність водія – це властивість зберігати працездатність у межах встановлених норм робочого часу, що обчислюється в годинах. Безвідмовність водія змінюється протягом робочого дня різним чином [3].

Безпека і надійність роботи системи «водій – автомобіль – дорога – середовище» залежить від безперебійної, якісної роботи всіх її складових частин та елементів. У переважній більшості випадків збої і відмови в цій системі відбуваються з вини водія.

Це дає змогу стверджувати, що дослідження впливу параметрів транспортного затору на змінювання стану водія є актуальною проблемою, вирішення якої значною мірою впливає на надійність діяльності транспортної системи. Звідси випливає, що необхідно досліджувати, як впливає перебування водія в заторах на його функціональний стан і безвідмовність.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дорожні затори значно обмежують свободу діяльності водія і призводять до підвищення його емоційного стану і зростання рівня втоми. Автори роботи [4] показали, що затори на дорогах, які безпосередньо впливають на настрій і дії водія, стали серйозною проблемою в години пік в більшості міст Китаю. В даний час вивчення настрою і дій водія в умовах заторів на дорогах є недостатнім, тому необхідно вивчити взаємозв'язок між настроєм і діями водія та заторами на дорогах. Виявлено, що водії в заторах здійснюють небезпечні маневри по зміні смуги руху, створюючи аварійні ситуації. Проводячи важливі дослідження в заторах по оцінці стану водія, автори не виявили зв'язок між зміною рівня напруги і ймовірністю скоєння ДТП після виходу із затору.

У дослідженні [5] вивчені властивості емоційного стану водіїв і їх зв'язок з агресивним водінням. Дослідження проведені в п'яти китайських містах шляхом опитування водіїв і оцінки їх стану за спеціальною шкалою. Високий емоційний стан водія було в значній мірі пов'язано з агресивним водінням. Аналіз щодо важливості факторів, що впливають на емоції показав, що найбільш негативним є повільне водіння, близьке до затору. Однак в роботі не встановлено зв'язок між емоціями і надійністю водія.

Автори у своїй роботі [6] також досліджували вплив емоцій на поведінку водіїв. У змодельованих умовах водіння дві групи водіїв відчували умови, які або збільшували емоційний настрій, або ні. Спровоковані різними ситуаціями водії повідомили про більш високі збільшення гнівного настрою в порівнянні з контрольною групою після початкового водіння, і це збільшення залишало-

ся стабільним протягом наступного нейтрального водіння. Виявлено, що водіям з більш високим ступенем напруженості було потрібно більше часу, щоб зробити коригувальні дії, щоб уникнути потенційних зіткнень. Однак в роботі не досліджені затори, які є потенційними джерелами погіршення настрою водіїв і підвищення рівня стресу.

В роботі [7] аналізується модель заторів в центрі міста в години пік, заснована на ідеях, висунутих Вільямом Викри. Наведено взаємозв'язок між швидкістю і щільністю транспортного потоку. Проте, як впливають затори на стан водія, в даній роботі не розглянуто.

В роботі [8] досліджений і показаний механізм утворення заторів на автомагістралях Китаю. Разом з тим дослідження, що стосуються змінювання стану водія в цій роботі не наведено.

В роботі [9] проведено дослідження і виявлено взаємозв'язок між тривалістю поведінки через дощових опадів в деяких районах Китаю і поведінкою водіїв, що призводить до появи заторів на дорогах. В процесі моделювання виявлено, що поведінка водія по-різному відбивається на формуванні заторів різної тривалості. Однак дослідження щодо оцінки впливу заторів на безвідмовність водія в роботі не наведено.

Автори роботи [10] навели результати досліджень, спрямовані на встановлення залежності появи заторів через ДТП. При цьому не досліджені питання пов'язані з поведінкою і надійністю водія і не досліджено взаємозв'язок між заторами і ймовірністю появи ДТП після виходу із затору.

У роботі [11] наведено, що перебування у транспортних заторах негативно позначається на психофізіологічному стані водія, спричиняючи погіршення його функціонального стану і психічний розлад. Однак в цій роботі не запропоновані моделі зміни стану водія в заторах, за якими можна було б оцінити його безвідмовність після затору.

В роботі [12] відзначено, що затори на дорогах є однією з найбільших проблем, пов'язаних з дорожнім рухом. В роботі розглянута модель водія, яка прогнозує появу заторів на основі змін поведінці водія. При цьому водій не спирається на моніторинг транспортних потоків. Однак як впливають затори на стан водія і на ймовірність скоєння ДТП після затору в цій роботі не розглянуто.

Автори роботи [13] в своїх дослідженнях показали негативну роль дорожніх заторів. При цьому вони розглянули періодичні і постійні затори і як вони впливають на зміну швидкості і втрати часу на пересування. Ці втрати були переведені в грошову форму, як плату суспільства за утворення заторів. Аспекти негативного впливу заторів на безпеку дорожнього руху в даній роботі не досліджені.

Такі якості водія як час реакції водія, стаж роботи, темперамент у своїх дослідженнях розглядали автори роботи [14]. Відзначено, що перебування в транспортному заторі негативно впливає на психофізіологічні якості водія, збільшуючи час його реакції. Однак в цій роботі не проведена оцінка безвідмовності водія після затору.

У дослідженні [15] представлені дані про рівень стресу водія в залежності від умов руху і типу дороги. Відзначено, що умови руху, які визначаються як затор, також істотно вплинули на рівень стресу водія при використанні крите-

рію швидкості транспортного засобу 40 км/год і стандартного відхилення швидкості 20 км/год. Подальші дослідження з вивчення впливу рівня напруженості водія на ймовірність скоєння ДТП в роботі не проведені.

Дослідження [16] присвячено встановленню динаміки зміни рівня втоми середньостатистичного водія в заторі, що впливає на безпеку дорожнього руху. Розроблено лінійні і нелінійні моделі впливу заторів на рівень стомлюваності водія, що дозволяють оцінити їх стан в залежності від віку та тривалості затору. Відзначено, що рівень втоми водія, який визначається зміною його функціонального стану, збільшується під час його перебування в заторі. Однак оцінка безвідмовності водія після затору в цій роботі не проведена.

Автори роботи [17] провели дослідження, пов'язані з утворенням заторів через перерозподіл пасажиропотоків з легкових автомобілів на автобуси і навпаки. З одного боку, було проведено первинне обстеження для визначення переходу режиму з автобуса на автомобіль, коли автобуси недоступні. Воно було використано для оцінки позитивного впливу автобусів на зниження заторів. З іншого боку, негативний вплив автобусів було досліджено з урахуванням впливу автобусних зупинок на рух транспортних засобів. Однак подальші дослідження по визначенні впливу заторів на стан водіїв не були проведені.

Автори роботи [18] досліджували проблеми управління транспортними потоками в умовах випадкового затору. Побудована модель катастрофи для транспортного потоку при випадковій завантаженості. Критичний стан транспортної мережі при випадковому заторі аналізується за допомогою цієї моделі. Запропоновано схему управління потоком трафіку з метою максимізації пропускної здатності. Однак питання, що стосуються стану водія і його безвідмовності, в цій роботі не розглянуто.

В роботі [19] розглядається вплив дорожніх умов на водіїв вантажівок. Для оцінки стану водія використовуються метод гальванічної шкірної реакції і метод електрокардіограми, засновані на оцінці варіабельності серцевого ритму. Отримані результати показують, що ступінь небезпеки в реальній ситуації водіння можна оцінити шляхом зміни функціонального стану водія як реакції на зміну граничних характеристик стану водія. Змінювання стану водія в умовах заторів авторами роботи не розглянуто.

В роботі [20] авторами було виявлено зв'язок між відволіканням водія і часом реакції. Аналіз показав, що тривалість відволікання водія є основною прямою причиною збільшення часу реакції, а інші чинники мають непрямі ефекти. Час реакції водія є важливою характеристикою від якої залежить безпека дорожнього руху. Однак в роботі не досліджувалося зміна часу реакції в умовах заторів, яке впливає на безвідмовність водія.

Питання впливу часу реакції водія на ймовірність скоєння дорожньо-транспортної пригоди та ймовірність скоєння дорожньо-транспортної пригоди на елементах транспортної мережі розглянуті в роботі [21]. Однак авторами не подані моделі зміни безвідмовності водія через дорожні затори.

Авторами роботи [22] розглянуті питання, пов'язані з впливом швидкості руху на появу ДТП. Показано, що у водіїв, що перевищили дозволenu швидкість, час реакції був вище. Пропонуються рекомендації щодо зміни розрахунку

кового часу реакції водіїв при проведенні експертиз ДТП. Однак не встановлені причини, що призвели до підвищення часу реакції водіїв. Не досліджені зміни часу реакції в заторах, які можуть з'явитися причинами цих змін.

Автори роботи [23], ґрунтуючись на квантовій теорії оптичного потоку, запропонували динамічну і стохастичну модель сприйняття водія, щоб досліджувати зв'язок між невизначеністю сприймається відносної швидкості і часу реакції під час проходження автомобіля. Зокрема, пропонується модель передбачає, що сприйнятна водієм швидкість і час реакції змінюються в часі і є невизначеними. Однак відповідні взаємозв'язки в умовах заторів в цій роботі не досліджені.

$$\vec{P}_{\text{ДТП}} = \frac{\left(\overset{\leftarrow}{F}^{0,75} + \vec{F}^{0,35} \right) \cdot \vec{F}^{1,25} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{H},$$

В роботі [24] встановлено взаємозв'язок між часом реакції водія і умовами руху. Було виявлено, що час реакції водія тісно пов'язане з рухом часу, особливо у фазі уповільнення. Проміжок часу можна точно передбачити, коли відомий час реакції і початковий зсув часу. Однак в роботі не визначено взаємозв'язок між часом реакції водія і ймовірністю скоєння ДТП через дорожні затори.

Аналіз літературних даних [4–24] показує, що дослідження транспортних заторів до теперішнього часу проведено не в повному обсязі, а мають фрагментарний характер. Дослідження стосувалися або окремо водія, або зміни характеристик транспортного потоку без урахування людського фактора і його впливу на безпеку дорожнього руху.

Це дозволяє стверджувати, що необхідний системний підхід при дослідженні транспортних заторів і їх наслідків з урахуванням зміни функціонального стану водія. Необхідно розробити моделі оцінки безвідмовності водія в транспортній системі з урахуванням заторів руху для прогнозування розвитку дорожньо-транспортної ситуації після них і підвищення безпеки руху.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка моделей оцінки безвідмовності водія в транспортній системі міста з урахуванням заторів руху.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- оцінити ймовірність виникнення дорожньо-транспортної пригоди з окремим учасником дорожнього руху з урахуванням транспортного затору;
- обрати структуру моделей, які описують вплив заторів на безвідмовність водія на елементах транспортної системи;
- виявити закономірності змінювання ймовірності виникнення дорожньо-транспортної пригоди з урахуванням заторів руху;
- визначити адекватність розроблених моделей.

4. Оцінка безвідмовності водія в транспортній системі з урахуванням заторів руху

4.1. Оцінювання ймовірності виникнення дорожньо-транспортної пригоди з окремим учасником дорожнього руху

Надійність може трактуватися [3] як безвідмовність функціонування системи, а в межах даного дослідження – безаварійність або ймовірність виникнення ДТП, і чим меншою є ця ймовірність, тим більшою є надійність.

Аналіз методів визначення рівня аварійності на ділянках транспортної мережі показав, що їхнє застосування не дає змоги кількісно оцінити можливу ймовірність виникнення ДТП із окремим учасником дорожнього руху. Наявні методи оцінювання рівня аварійності на перехрестях вулиць і доріг можуть, при їхньому певному доопрацюванні допомогти визначити ймовірність виникнення ДТП окремого учасника руху.

На підставі [25] було розроблено математичну модель визначення ймовірності виникнення ДТП на ділянках транспортної мережі з окремим учасником руху:

$$\vec{P}_{\text{ДТП}} = \frac{\left(\overset{\leftarrow}{F}^{0,75} + \vec{F}^{0,35} \right) \cdot \vec{F}^{1,25} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{H}, \quad (1)$$

де k_a – підсумковий коефіцієнт аварійності; l – довжина ділянки дороги, км; \vec{F} , $\overset{\leftarrow}{F}$ – інтенсивність руху попутного й зустрічного потоків транспортних засобів відповідно, авт./год; H – ширина проїзної частини, м.

Удосконалено також математичну модель визначення ймовірності виникнення ДТП у транспортних вузлах з окремим учасником руху [25]:

$$P_{\text{ДТП}} = \frac{50 \cdot k_i \cdot M_i \cdot N_i}{k_p \cdot 10^{14}} \cdot \frac{N_{\tau i} + M_{\tau i}}{N_i + M_i}, \quad (2)$$

де k_i – коефіцієнт складності конфліктної точки; k_p – коефіцієнт річної нерівномірності інтенсивності руху; M_i , N_i – сумарні інтенсивності руху на дорогах, що перетинаються, авт./добу; $M_{\tau i}$, $N_{\tau i}$ – інтенсивності потоків, що перетинаються в конфліктній точці під час проїзду транспортного засобу через перехрестя, авт./добу.

Для визначення ймовірності скоєння ДТП окремим учасником руху за наявності транспортного затору необхідно продовжити вдосконалення моделі (1), (2). Раніше проведені дослідження показали, що транспортний затор негативно впливає на рівень втоми і на час реакції водіїв усіх темпераментів, крім флегматиків [26]. Тому видається можливим включити в моделі (1) і (2) коефіцієнти, що відображають ці зміни. Тоді ці моделі будуть такими:

$$\vec{P}_{\text{ДТП}}^{\rightarrow \text{д}} = \frac{\left(\vec{F}^{\leftarrow 0,75} + \vec{F}^{\rightarrow 0,35} \right) \cdot \vec{F}^{\rightarrow 1,25} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{H} \cdot k_{\text{ТЗ}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{ДТП}} = \frac{50 \cdot k_i \cdot M_i \cdot N_i}{k_p \cdot 10^{14}} \cdot \frac{N_{\text{тi}} + M_{\text{тi}}}{N_i + M_i} \cdot k_{\text{ТЗ}}, \quad (4)$$

де $k_{\text{ТЗ}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив транспортного затору.

Коефіцієнт, що враховує вплив затору, можна визначити на підставі змінювання часу реакції водія (ΔT_p) за моделлю розробленої в роботі [27], і часу реакції водія (T_p), що дорівнює 0,8 с.

До того ж значення коефіцієнта $k_{\text{ТЗ}}$ приймаємо рівним $\frac{T_p + \Delta T_p}{T_p}$.

Тоді ці моделі будуть такими:

$$\vec{P}_{\text{ДТП}}^{\rightarrow \text{д}} = \frac{\left(\vec{F}^{\leftarrow 0,75} + \vec{F}^{\rightarrow 0,35} \right) \cdot \vec{F}^{\rightarrow 1,25} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{H} \cdot \frac{T_p + \Delta T_p}{T_p}, \quad (5)$$

$$P_{\text{ДТП}} = \frac{50 \cdot k_i \cdot M_i \cdot N_i}{k_p \cdot 10^{14}} \cdot \frac{N_{\text{тi}} + M_{\text{тi}}}{N_i + M_i} \cdot \frac{T_p + \Delta T_p}{T_p}. \quad (6)$$

Розроблена в роботах [14, 27] модель змінювання часу реакції водія (ΔT_p) має такий вигляд:

$$\Delta T_p = 0,029 + 0,022 \cdot (P_{\text{ск}} - P_{\text{сп}})^2, \quad (7)$$

де $P_{\text{ск}}$ – середньостатистичний показник рівня стомлення усієї сукупності водіїв під час виходу із транспортного затору, ум. од.; $P_{\text{сп}}$ – середньостатистичний показник рівня стомлення усієї сукупності водіїв під час входу в транспортний затор, ум. од.

При розробці моделі (7) в основу збору статистичних даних покладено підхід академіка Митропольського А. К., згідно з яким розмір вибірки для її відповідності генеральної сукупності визначається з таблиці досить великих чисел [28]. Ця таблиця показує, як досить велика кількість спостережень (обсяг вибірки) залежить від «ступеня впевненості», величини допустимої помилки і самої невідомої частки. Залежність від невідомої частки виключається, вибираючи для неї найгірше значення. Тому досить велика кількість виходить завищеною.

При ймовірності, з якою робиться відповідний висновок рівній 0,95 і допустимій помилки рівній 0,05, досить велике число спостережень дорівнює 384.

До вибірки увійшли водії віку від 19 до 67 років чотирьох основних типів темпераментів. Причому, якщо один і той же водій досліджувався в кількох заторах, наприклад, в чотирьох, то у вибірку ці дослідження включалися як чотири незалежних спостереження.

У зв'язку з тим, що у вибірку увійшли водії різного віку і темпераментів, то і розроблена модель (7) є застосовуваною до середньостатистичного водія.

Для визначення часу реакції водія використовувався прилад, який складається з телескопічної антени, таймера, указки і вмикача світлового сигналу. Час реакції водія визначався за моментом натискання водієм спеціальною указкою на відповідну ділянку телескопічної антени після подачі сигналу. У момент подавання сигналу вмикався таймер, який зупинявся після торкання указкою антени. Щоб гарантувати безпеку дорожнього руху, зручний момент для визначення часу реакції обирався самим водієм.

Щоб скласти математичну модель (7) впливу транспортного затору на функціональний стан водія і на час його реакції, було проведено відповідні дослідження, які наведені в роботі [14]. Одночасно вимірювали функціональний стан і час реакції водіїв до транспортного затору, в період перебування в транспортному заторі і після нього [27].

З урахуванням моделі (7) формули (5), (6) набудуть такого вигляду:

$$P_{\text{ДТП}}^{\rightarrow \phi} = \frac{\left(\overset{\leftarrow 0,75}{F} + \overset{\rightarrow 0,35}{F} \right) \cdot \overset{\rightarrow 1,25}{F} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{H} \times \frac{T_p + 0,029 + 0,022 \cdot (P_{\text{ск}} - P_{\text{сн}})^2}{T_p}, \quad (8)$$

$$P_{\text{ДТП}} = \frac{50 \cdot k_i \cdot M_i \cdot N_i}{k_p \cdot 10^{14}} \cdot \frac{N_{\text{тi}} + M_{\text{тi}}}{N_i + M_i} \times \frac{T_p + 0,029 + 0,022 \cdot (P_{\text{ск}} - P_{\text{сн}})^2}{T_p}. \quad (9)$$

Рівень втоми визначався за методом проф. Баєвського Р. М. шляхом вимірювання електрокардіограми та аналізу послідовності кардіоінтервалів електрокардіограми, яка є закодованою інформацією про процеси, що протікають в організмі водія [28].

Рівень стомлення дає змогу диференціювати різні ступені напруженості регуляторних систем і оцінити адаптаційні можливості організму [28]. Його обчислюють за алгоритмом, що враховує п'ять критеріїв: сумарний ефект регуляції (за показниками математичного очікування), функція автоматизму (за середнім квадратичним відхиленням, за варіаційним розмахом і за коефіцієнтом варіації), вегетативний гомеостаз (за комплексом показників: варіаційним розмахом, амплітудою моди, індексом напруженості регуляторних систем), стійкість регуляції (за коефіцієнтом варіації), активність підкіркових нервових центрів (визначають на основі відносних потужностей дихальних хвиль і хвиль першо-

го та другого порядку з виділенням станів вираженого і помірного посилення активності підкіркових нервових центрів).

Середньостатистичний показник рівня стомлення усієї сукупності водіїв під час виходу із транспортного затору $P_{ск}$, розроблений в роботі [16], має такий вигляд:

$$P_{ск} = 0,018 \cdot B_{в} + 1,278 \cdot T_3^{0,41} + 0,291 \cdot P_{сп}. \quad (10)$$

Для розроблення регресійної моделі (10) середньостатистичного водія залучалися водії з усіма типами нервової системи. В дослідженнях брали участь водії всіх вікових груп і категорій. Експериментальні дослідження становили собою фіксування електрокардіограми водіїв під час входження в транспортний затор, у затору і під час виходу з нього.

Формули (8) і (9) для оцінювання ймовірності виникнення ДТП на ділянках транспортної мережі і в транспортних вузлах із окремим учасником руху з урахуванням моделі (10) приймуть наступний вигляд:

$$P_{ДТП}^{\rightarrow \theta} = \frac{\left(\overset{\leftarrow}{F}^{0,75} + \vec{F}^{0,35} \right) \cdot \vec{F}^{1,25} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{H} \times \frac{T_p + 0,029 + 0,022 \cdot \left(0,018 \cdot B_{в} + 1,278 \cdot T_3^{0,41} - 0,709 \cdot P_{сп} \right)^2}{T_p}, \quad (11)$$

$$P_{ДТП} = \frac{50 \cdot k_i \cdot M_i \cdot N_i}{k_p \cdot 10^{14}} \cdot \frac{N_{\tau i} + M_{\tau i}}{N_i + M_i} \times \frac{T_p + 0,029 + 0,022 \cdot \left(0,018 \cdot B_{в} + 1,278 \cdot T_3^{0,41} - 0,709 \cdot P_{сп} \right)^2}{T_p}. \quad (12)$$

З формул (11), (12) випливає, що ймовірність скоєння ДТП на елементах транспортної системи залежить від інтенсивностей транспортних потоків, часу реакції водія в заторі, віку водія, рівня втоми при входженні в затор, а також від тривалості затору.

4. 2. Опис структури моделей що впливають на безвідмовність водія на елементах транспортної системи

Для визначення у скільки разів ймовірність скоєння ДТП середньостатистичним водієм на ділянках транспортної мережі із затором вище, ніж ця ж ймовірність без затору, було розглянуто співвідношення цих ймовірностей з урахуванням формули (11):

$$\frac{P_3}{P_{\text{бз}}} = \frac{\left(\overleftarrow{F}_3^{0,75} + \overrightarrow{F}_3^{0,35} \right) \cdot \overrightarrow{F}_3^{1,25} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{\left(\overleftarrow{F}_{\text{бз}}^{0,75} + \overrightarrow{F}_{\text{бз}}^{0,35} \right) \cdot \overrightarrow{F}_{\text{бз}}^{1,25} \cdot l \cdot k_a \cdot 2 \cdot 10^{-10}} \times \frac{H}{H} \times \frac{T_p + 0,029 + 0,022 \cdot (0,018 \cdot B_{\text{в}} + 1,278 \cdot T_3^{0,41} - 0,709 \cdot P_{\text{сп}})^2}{T_p}, \quad (13)$$

де $\overrightarrow{F}_3, \overleftarrow{F}_3$ – інтенсивність руху попутного й зустрічного потоків транспортних засобів при заторі, авт./год; $\overrightarrow{F}_{\text{бз}}, \overleftarrow{F}_{\text{бз}}$ – інтенсивність руху попутного й зустрічного потоків транспортних засобів без затору відповідно, авт./год.

Співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для водія в транспортних вузлах із урахуванням формули (12) визначається так:

$$\frac{P_3}{P_{\text{бз}}} = \frac{\frac{50 \cdot k_3 \cdot M_3 \cdot N_3}{k_p \cdot 10^{14}} \cdot \frac{N_{\text{тз}} + M_{\text{тз}}}{N_3 + M_3}}{\frac{50 \cdot k_{\text{бз}} \cdot M_{\text{бз}} \cdot N_{\text{бз}}}{k_p \cdot 10^{14}}} \times \frac{T_p + 0,029 + 0,022 \cdot (0,018 \cdot B_{\text{в}} + 1,278 \cdot T_3^{0,41} - 0,709 \cdot P_{\text{сп}})^2}{\frac{N_{\text{тбз}} + M_{\text{тбз}}}{N_{\text{бз}} + M_{\text{бз}}} \cdot T_p}, \quad (14)$$

де M_3, N_3 – сумарні інтенсивності руху на дорогах, що перетинаються при заторі, авт./добу; $M_{\text{тз}}, N_{\text{тз}}$ – інтенсивності потоків, що перетинаються в конфліктній точці під час проїзду транспортного засобу через перехрестя при заторі, авт./добу; $M_{\text{бз}}, N_{\text{бз}}$ – сумарні інтенсивності руху на дорогах, що перетинаються без затору, авт./добу; $M_{\text{тбз}}, N_{\text{тбз}}$ – інтенсивності потоків, що перетинаються в конфліктній точці при проїзді транспортного засобу через перехрестя без затору, авт./добу.

Після відповідних перетворень формули (13) і (14) набудуть такого остаточного вигляду:

$$\frac{P_3}{P_{\text{бз}}} = \frac{\left(\overset{\leftarrow}{F_3}{}^{0,75} + \overset{\rightarrow}{F_3}{}^{0,35} \right) \cdot \overset{\rightarrow}{F_3}{}^{1,25} \cdot \left(T_p + 0,029 + 0,022 \cdot \left(\begin{matrix} 0,018 \cdot B_{\text{в}} + \\ +1,278 \cdot T_3^{0,41} - \\ -0,709 \cdot P_{\text{сп}} \end{matrix} \right)^2 \right)}{\left(\overset{\leftarrow}{F_{\text{бз}}}{}^{0,75} + \overset{\rightarrow}{F_{\text{бз}}}{}^{0,35} \right) \cdot \overset{\rightarrow}{F_{\text{бз}}}{}^{1,25} \cdot T_p}, \quad (15)$$

$$\frac{P_3}{P_{\text{бз}}} = \frac{M_3 \cdot N_3 \cdot \frac{N_{\text{тз}} + M_{\text{тз}}}{N_3 + M_3} \cdot \left(T_p + 0,029 + 0,022 \cdot \left(\begin{matrix} 0,018 \cdot B_{\text{в}} + \\ +1,278 \cdot T_3^{0,41} - \\ -0,709 \cdot P_{\text{сп}} \end{matrix} \right)^2 \right)}{M_{\text{бз}} \cdot N_{\text{бз}} \cdot \frac{N_{\text{тбз}} + M_{\text{тбз}}}{N_{\text{бз}} + M_{\text{бз}}} \cdot T_p}. \quad (16)$$

Таким чином, співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для середньостатистичного водія зводиться до визначення відношення інтенсивностей потоків і змінювання його часу реакції.

Так як інтенсивності транспортних потоків у формулі (15) розглядаються за годину, а у формулі (16) за добу, то можна припустити, що вони за ці періоди вирівнюються і будуть однаковими. Тоді інтенсивності транспортних потоків з затором і без нього скоротяться або їх відношення дорівнюватиме константі, близькою до одиниці. Тоді представляється можливим оцінити безвідмовність водія після впливу умов затору тільки зміною його функціонального стану і часу реакції:

$$\frac{P_3}{P_{\text{бз}}} = C \cdot \frac{T_p + 0,029 + 0,022 \cdot \left(0,018 \cdot B_{\text{в}} + 1,278 \cdot T_3^{0,41} - 0,709 \cdot P_{\text{сп}} \right)^2}{T_p}, \quad (17)$$

де C – константа (в даній статті C прийнято рівній одиниці).

4. 3. Закономірності змінювання ймовірності виникнення дорожньо-транспортної пригоди з урахуванням заторів руху

Для оцінки ймовірності виникнення дорожньо-транспортної пригоди з середньостатистичним водієм необхідно оцінити співвідношення ймовірностей

скоєння дорожньо-транспортної пригоди на ділянках транспортної системи з затором і без нього. Кінцеві значення цих співвідношень в заторі будуть значеннями рівнів безвідмовності водія на ділянці мережі відразу після затору. Для цієї оцінки за допомогою моделі (17) було розраховано відповідні співвідношення ймовірностей для водіїв двадцяти і шістдесяти років при різних тривалостях затору для шести варіантів заторів (від 3 до 18 хвилин з інтервалом в 3 хвилини) і різних початкових значеннях рівня стомлення перед затором.

Змінювання співвідношення ймовірностей скоєння ДТП з урахуванням затору і без нього залежно від тривалості заторів, суміщених в одному графіку, наведено на рис. 1–8.

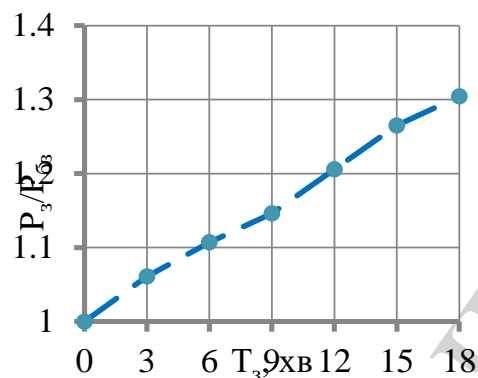


Рис. 1. Зміна відношення ймовірностей скоєння ДТП з транспортним затором і без нього для середньостатистичного водія віку 20 років в залежності від тривалості затору при $P_{ст}=2$ ум. од.

Як зрозуміло з рис. 1, при $P_{ст}=2$ ум. од. в транспортному заторі співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього зі збільшенням тривалості затору у середньостатистичного водія збільшується наприкінці затору та при тривалості 18 хвилин і сягає 1,3.

Це означає, що затор тривалістю 18 хвилин підвищує ймовірність скоєння ДТП на ділянці мережі, наступного за затором на 30 % в порівнянні з цією ж ділянкою без затору. А затор тривалістю 9 хвилин підвищує цю ймовірність на 15 %. Аналогічно з рис. 1 можна визначити ймовірність скоєння ДТП на ділянці мережі після заторів будь-якої тривалості.

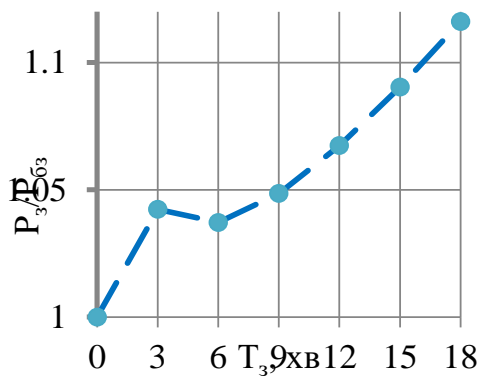


Рис. 2. Зміна відношення ймовірностей скоєння ДТП з транспортним затором і без нього для середньостатистичного водія віку 20 років в залежності від тривалості затору при $P_{\text{сп}}=4$ ум. од.

При $P_{\text{сп}}=4$ ум. од. відношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для водія двадцяти років змінюється так (рис. 2). До третьої хвилини затору співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для середньостатистичного водія трохи збільшується. До шостої хвилини це співвідношення практично не змінюється, а далі воно збільшується до 1,12.

З рис. 2 випливає, наприклад, що затор тривалістю 6 хвилин призводить до підвищення ймовірності скоєння ДТП на ділянці мережі після нього на 4 %, а при тривалості 12 хвилин – на 7 %.

Динаміку змінювання співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для середньостатистичного водія у транспортному заторі при $P_{\text{сп}}=6$ ум. од. подано на рис. 3.

Співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для нього до третьої хвилини затору збільшується значно до 1,135 внаслідок інерційних процесів в організмі водія, так як він увійшов в затор в напруженому стані з високим рівнем втоми. Далі це співвідношення для середньостатистичного водія знижується, сягаючи наприкінці затору 1,04. Наслідки впливу затору на стан водія в цьому випадку незначні. Водій «відпочиває» в заторі (приходить в норму) після входу в нього з високим рівнем втоми.

Змінювання співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для середньостатистичного водія у заторі в трьох вимірах, виконаного за допомогою формули (17), наведено на рис. 4.

Співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього у середньостатистичного водія при $P_{\text{сп}}=6$ ум. од. до третьої хвилини затору трохи збільшується. Далі це співвідношення у середньостатистичного водія постійно знижується, сягаючи наприкінці затору 1,04 (рис. 4).

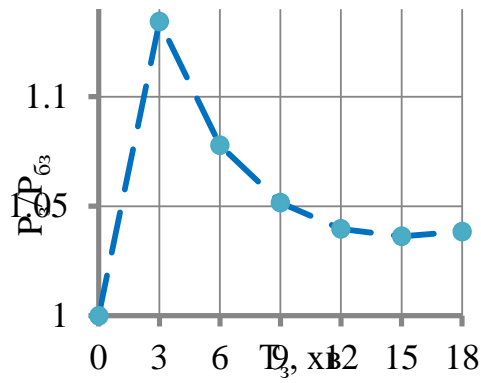


Рис. 3. Зміна відношення ймовірностей скоєння ДТП з транспортним затором і без нього для середньостатистичного водія віку 20 років в залежності від тривалості затору при $P_{сп}=6$ ум. од.

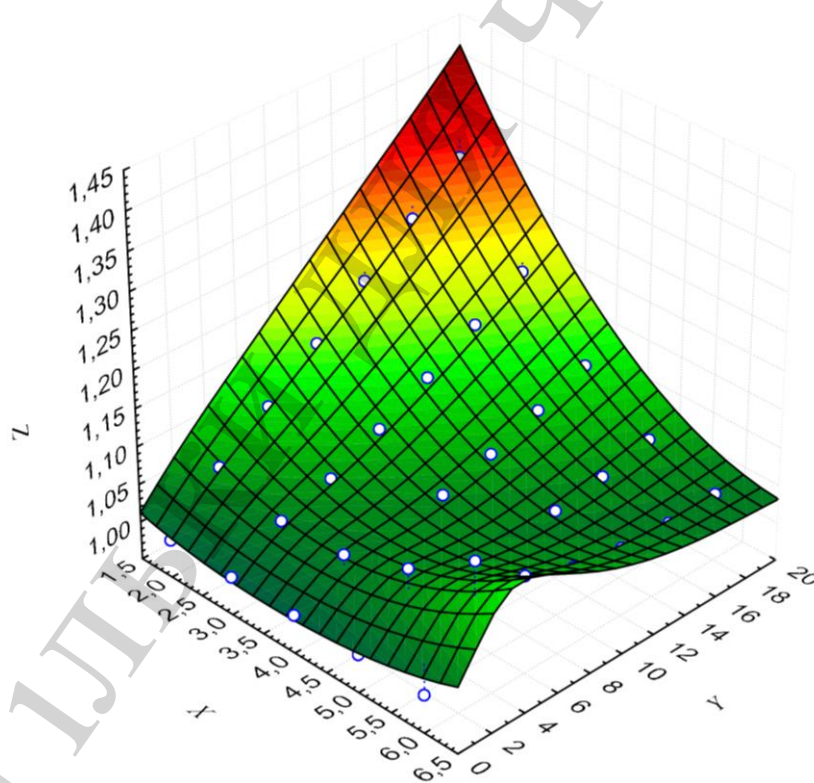


Рис. 4. Залежність співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього (Z) для середньостатистичного водія 20 років залежно від початкового рівня стомлення (X) та тривалості затору (Y)

Якщо початковий рівень стомлення дорівнює 2 ум. од., для шістдесятирічних водіїв тенденція змінювання співвідношення ймовірностей скоєння дорож-

ньо-транспортної пригоди із затором і без нього подана на рис. 5, аналогічна до змінювання, поданого на рис. 1. Співвідношення ймовірностей скоєння водіями ДТП із затором і без нього збільшується, а наприкінці затору це змінювання сягає у середньостатистичного водія 1,44. Це означає, що затор тривалістю 18 хвилин призводить до підвищення ймовірності скоєння ДТП на участі мережі більш ніж на 40 %.

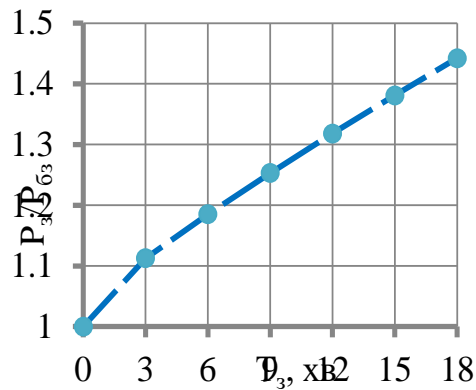


Рис. 5. Зміна відношення ймовірностей скоєння ДТП з транспортним затором і без нього для середньостатистичного водія віку 60 років в залежності від тривалості затору при $P_{cn}=2$ ум. од.

При $P_{cn}=4$ ум. од. (рис. 6) тенденція змінювання співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього відбувається аналогічно до змінювання наведеного на рис. 2. Наприкінці затору це змінювання сягає у середньостатистичного водія 1,2, тобто затор призводить до підвищення скоєння ДТП на 20 %. А при тривалості затору наприклад 12 хвилин, це підвищення дорівнює 12 %.

На рис. 7 співвідношення ймовірностей скоєння дорожньо-транспортної пригоди із затором і без нього середньостатистичного водія зростає до третьої хвилини затору внаслідок інерційних процесів в організмі водія, потім знижується до шостої хвилини, далі знову зростає, сягаючи наприкінці затору 1,07. Такий самий стан, як і у двадцятирічних водіїв, забезпечує менше відносне збільшення ймовірності ДТП, ніж це відбувається при нормальному стані ($P_{cn}=2$ ум. од.), при якому відсоток збільшення ймовірності ДТП на ділянках транспортної системи внаслідок затору може досягати 15 %.

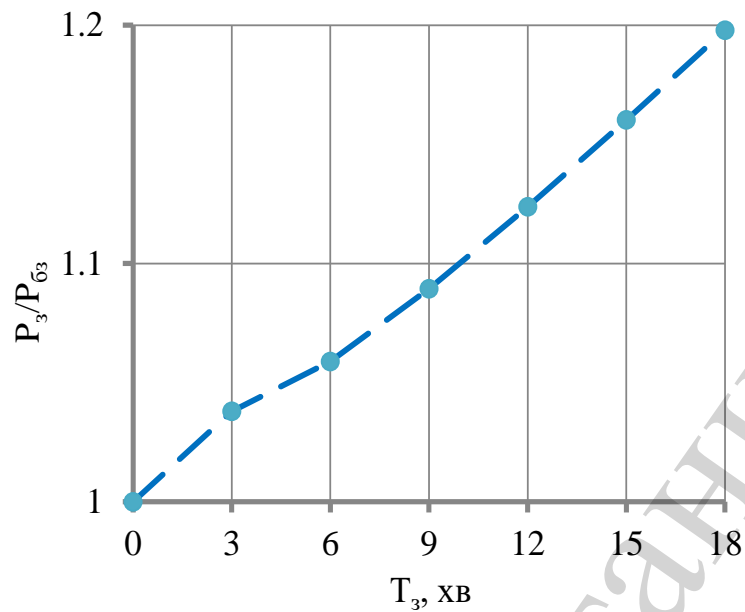


Рис. 6. Зміна відношення ймовірностей скоєння ДТП з транспортним затором і без нього для середньостатистичного водія віку 60 років в залежності від тривалості затору при $P_{cn}=4$ ум. од.

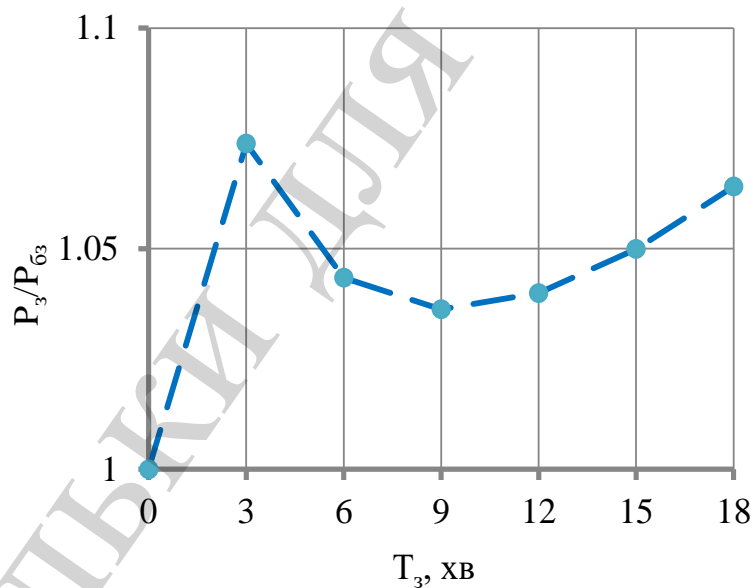


Рис. 7. Зміна відношення ймовірностей скоєння ДТП з транспортним затором і без нього для середньостатистичного водія віку 60 років в залежності від тривалості затору при $P_{cn}=6$ ум. од.

Змінювання співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього на ділянках транспортної системи для середньостатистичного водія 60 років у заторі в і трьох вимірах, виконаного за допомогою формули (17), наведено на рис. 8.

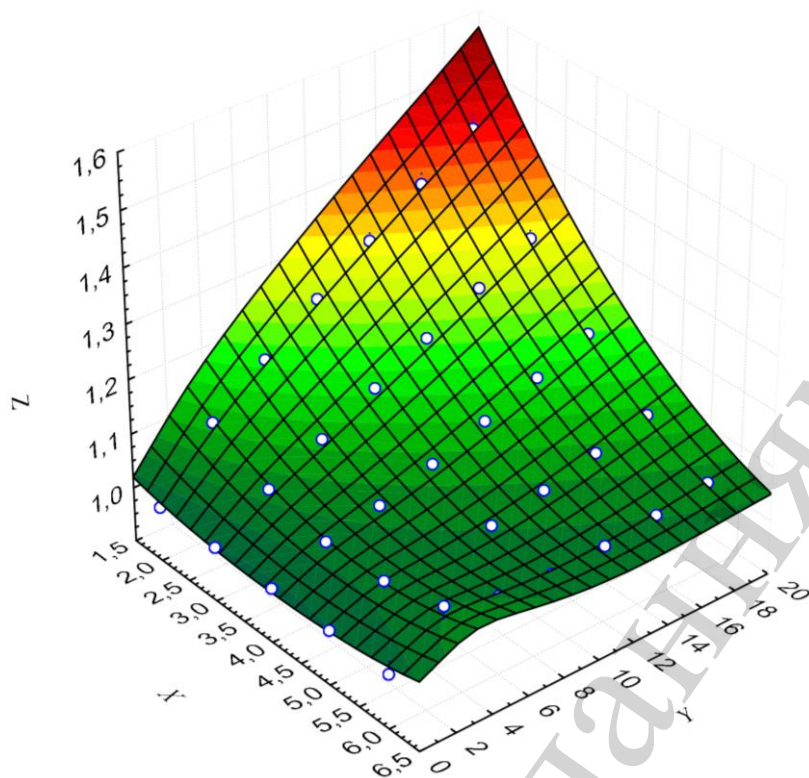


Рис. 8. Залежність співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього (Z) для середньостатистичного водія 60 років залежно від початкового рівня стомлення (X) та тривалості затору (Y)

Із рис. 8 випливає, що для середньостатистичного водія відносно збільшення ймовірності ДТП на ділянках транспортної системи з затором до ймовірності ДТП без затору збільшується до 1,6. При цьому вік водія впливає на відносне збільшення ймовірності ДТП з затором до ймовірності ДТП без затору незначно.

5. Оцінка адекватності розроблених моделей

Щоб оцінити співвідношення ймовірностей скоєння ДТП на ділянках транспортної системи із затором і без нього для середньостатистичного водія було розраховано рівень стомлення під час виходу із транспортного затору за допомогою моделі (10) і змінювання часу реакції водія за допомогою моделі (7). Це співвідношення було визначено для водіїв різних вікових груп при різних їхніх вихідних функціональних станах і різних тривалостях транспортних заторів (табл. 1).

Для перевірки адекватності отриманого значення співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для середньостатистичного водія був розроблений наступний підхід. Він полягає у співставленні цього значення і відповідного відношення кількості дорожньо-транспортних пригод на ділянках транспортної мережі та на перехрестях.

З цією метою були оброблені дані журналів Державтоінспекції про ДТП, що сталися в місті Харкові. При цьому кількість ДТП, що трапилися на ділянках транспортної мережі та на перехрестях протягом року, були співставленні з кількістю ДТП за годину. Усього було розглянуто три варіанти, коли тривалості

транспортних заторів відповідали 3,5; 4,0 і 4,5 годинам. Загальний час руху до-
рівнював 16 годинам: із 6 годин ранку до 22 години ночі.

Таблиця 1

Оцінювання співвідношення ймовірностей скоєння ДТП на ділянках транспор-
тної системи із затором і без нього для середньостатистичного водія

Номер роз- рахунку	Вік во- дія, роки	Трива- лість за- тору, хв	Рівень стом- лення початко- вий, ум. од.	Змінювання часу реакції водія, с	Співвідношення ймо- вірності скоєння ДТП із затором і без нього
1	20	3	2	0,049	1,061
2	20	6	2	0,086	1,107
3	20	9	2	0,125	1,156
4	20	12	2	0,165	1,206
5	20	15	2	0,204	1,255
6	20	18	2	0,243	1,304
7	20	3	3	0,03	1,038
8	20	6	3	0,047	1,058
9	20	9	3	0,071	1,089
10	20	12	3	0,098	1,123
11	20	15	3	0,127	1,159
12	20	18	3	0,157	1,196
13	20	3	4	0,034	1,042
14	20	6	4	0,03	1,037
15	20	9	4	0,039	1,049
16	20	12	4	0,054	1,067
17	20	15	4	0,072	1,09
18	20	18	4	0,093	1,116
19	20	3	5	0,06	1,075
20	20	6	5	0,035	1,044
21	20	9	5	0,029	1,036
22	20	12	5	0,032	1,04
23	20	15	5	0,04	1,05
24	20	18	5	0,051	1,064
25	20	3	6	0,108	1,134
26	20	6	6	0,062	1,078
27	20	9	6	0,041	1,052
28	20	12	6	0,032	1,04
29	20	15	6	0,029	1,036
30	20	18	6	0,031	1,039
31	40	3	2	0,067	1,083
32	40	6	2	0,114	1,143
33	40	9	2	0,161	1,201
34	40	12	2	0,207	1,258
35	40	15	2	0,252	1,315
36	40	18	2	0,296	1,37
37	40	3	3	0,037	1,046
38	40	6	3	0,064	1,08
39	40	9	3	0,096	1,119
40	40	12	3	0,129	1,161

Продовження Таблиці 1

1	2	3	4	5	6
41	40	15	3	0,163	1,204
42	40	18	3	0,198	1,248
43	40	3	4	0,029	1,037
44	40	6	4	0,036	1,045
45	40	9	4	0,052	1,065
46	40	12	4	0,074	1,092
47	40	15	4	0,097	1,122
48	40	18	4	0,123	1,153
49	40	3	5	0,044	1,055
50	40	6	5	0,03	1,037
51	40	9	5	0,031	1,039
52	40	12	5	0,04	1,05
53	40	15	5	0,053	1,067
54	40	18	5	0,069	1,087
55	40	3	6	0,08	1,101
56	40	6	6	0,046	1,057
57	40	9	6	0,032	1,04
58	40	12	6	0,029	1,036
59	40	15	6	0,032	1,04
60	40	18	6	0,038	1,048
61	60	3	2	0,09	1,113
62	60	6	2	0,148	1,185
63	60	9	2	0,203	1,253
64	60	12	2	0,255	1,318
65	60	15	2	0,305	1,381
66	60	18	2	0,354	1,442
67	60	3	3	0,049	1,062
68	60	6	3	0,087	1,108
69	60	9	3	0,126	1,157
70	60	12	3	0,166	1,207
71	60	15	3	0,206	1,257
72	60	18	3	0,245	1,306
73	60	3	4	0,03	1,038
74	60	6	4	0,047	1,059
75	60	9	4	0,072	1,089
76	60	12	4	0,099	1,124
77	60	15	4	0,128	1,16
78	60	18	4	0,158	1,198
79	60	3	5	0,034	1,042
80	60	6	5	0,03	1,037
81	60	9	5	0,039	1,049
82	60	12	5	0,054	1,068
83	60	15	5	0,073	1,091
84	60	18	5	0,094	1,117
85	60	3	6	0,059	1,074
86	60	6	6	0,035	1,043
87	60	9	6	0,029	1,036
88	60	12	6	0,032	1,04

Закінчення Таблиці 1

1	2	3	4	5	6
89	60	15	6	0,04	1,05
90	60	18	6	0,051	1,064
Середнє значення співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для середньостатистичного водія					1,116

Результати опрацьованих даних журналів Державтоінспекції про ДТП для варіанту тривалістю 4 години наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Кількість ДТП протягом року на ділянках транспортної мережі при наявності транспортному заторі рівному 4,0 години

Номер ділянки	Кількість ДТП на одиницю часу на ділянках транспортної мережі, од./год		Співвідношення кількості ДТП на ділянках мережі із затором і без нього
	із затором	без затору	
1	2	3	4
1	0,00137	0,001142	1,200
2	0,002055	0,002283	0,900
3	0,00137	0,000913	1,500
4	0,00274	0,001826	1,500
5	0,00274	0,002968	0,923
6	0,002055	0,001598	1,286
7	0,00274	0,002055	1,333
8	0,000685	0,000685	1,000
9	0,00274	0,00137	2,000
10	0,00274	0,002511	1,091
11	0,00137	0,00137	1,000
12	0,002055	0,002283	0,900
13	0,002055	0,001142	1,800
14	0,00137	0,002055	0,667
15	0,00137	0,001142	1,200
16	0,00137	0,000913	1,500
17	0,000685	0,002055	0,333
18	0,000685	0,000685	1,000
19	0,002055	0,002511	0,818
20	0,000685	0,001826	0,375
21	0,00274	0,001598	1,714
22	0,003425	0,00274	1,250
23	0,00137	0,001598	0,857
24	0,000685	0,00137	0,500
25	0,00137	0,002511	0,545
26	0,00137	0,00137	1,000
27	0,00274	0,002055	1,333
28	0,00137	0,002283	0,600
29	0,000685	0,000913	0,750
30	0,000685	0,000685	1,000
31	0,00137	0,001826	0,750
32	0,002055	0,001142	1,800

Продовження Таблиці 2

1	2	3	4
33	0,00137	0,001598	0,857
34	0,000685	0,001142	0,600
35	0,00137	0,000913	1,500
36	0,000685	0,000913	0,750
37	0,002055	0,001826	1,125
38	0,00274	0,001598	1,714
39	0,002055	0,002511	0,818
40	0,000685	0,000913	0,750
41	0,000685	0,000685	1,000
42	0,000685	0,002055	0,333
43	0,003425	0,002511	1,364
44	0,00137	0,001142	1,200
45	0,002055	0,00274	0,750
46	0,000685	0,000685	1,000
47	0,000685	0,001826	0,375
48	0,00274	0,002511	1,091
49	0,002055	0,001598	1,286
50	0,00137	0,001826	0,750
51	0,00137	0,001598	0,857
52	0,002055	0,002055	1,000
53	0,000685	0,000913	0,750
54	0,000685	0,000685	1,000
55	0,000685	0,001598	0,429
56	0,002055	0,001142	1,800
57	0,00137	0,00274	0,500
58	0,000685	0,001142	0,600
59	0,000685	0,000913	0,750
60	0,000685	0,000685	1,000
61	0,002055	0,001826	1,125
62	0,00274	0,001598	1,714
63	0,002055	0,002511	0,818
64	0,000685	0,001826	0,375
65	0,00274	0,001598	1,714
66	0,002055	0,002511	0,818
67	0,00137	0,000913	1,500
68	0,00137	0,000685	2,000
69	0,002055	0,00274	0,750
70	0,00137	0,002055	0,667
71	0,000685	0,001826	0,375
72	0,00274	0,001598	1,714
73	0,000685	0,000685	1,000
74	0,00274	0,001826	1,500
75	0,002055	0,002055	1,000
76	0,000685	0,000685	1,000
77	0,00274	0,001826	1,500
78	0,003425	0,002511	1,364
79	0,00274	0,001598	1,714
80	0,000685	0,000913	0,750

Закінчення Таблиці 2

1	2	3	4
81	0,00274	0,002968	0,923
82	0,00274	0,001826	1,500
83	0,00274	0,001598	1,714
84	0,000685	0,000685	1,000
85	0,003425	0,001826	1,875
86	0,002055	0,002055	1,000
87	0,000685	0,000685	1,000
88	0,000685	0,001826	0,375
89	0,00274	0,001598	1,714
90	0,000685	0,000913	0,750
91	0,003425	0,002055	1,667
92	0,00274	0,001826	1,500
93	0,00274	0,001598	1,714
94	0,00411	0,00274	1,500
95	0,00137	0,001142	1,200
96	0,000685	0,00137	0,500
97	0,000685	0,001826	0,375
98	0,002055	0,001598	1,286
99	0,00411	0,00274	1,500
100	0,00274	0,002055	1,333
Середнє значення співвідношення кількості ДТП із затором і без нього			1,082

Середнє значення співвідношення кількості ДТП із затором і без нього при заторі рівному 3,5 години дорівнює 1,055, а при заторі рівному 4,5 – 1,219.

Результати опрацьованих даних журналів Державтоінспекції про кількість ДТП протягом року у вузлах мережі засвідчили наступні значення.

Середнє значення співвідношення кількості ДТП із затором і без нього при заторі рівному 3,5 години дорівнює 1,131, при заторі рівному 4,0 години дорівнює 1,184, а при заторі рівному 4,5 години дорівнює 1,24.

Співставлення оцінок співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із транспортним затором і без нього для середньостатистичного водія і середніх значень співвідношення кількості ДТП із транспортним затором і без нього на деяких ділянках транспортної мережі надано в табл. 3. Із табл. 3 випливає, що середня помилка апроксимації відхилення оцінок співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для водія, розрахована за моделлю (17) і середніх значень співвідношення кількості ДТП із затором і без нього на ділянках мережі, розрахованих за даними журналів Державтоінспекції про ДТП, що сталися в місті Харкові, є допустимою.

Змінювання співвідношення кількості ДТП протягом року на ділянках транспортної системи із затором і без нього для середньостатистичного водія в трьох вимірах з використанням пакету статистичного аналізу *STATISTICA 6.0* стосовно трьох із половиною, чотирьох, і чотирьох із половиною годин наведено на рис. 9–11.

Таблиця 3

Співвідношення оцінок ймовірностей скоєння ДТП на ділянках транспортної системи при наявності затору і без нього і середніх значень співвідношення кількості ДТП

Номер спостереження	Тривалість затору, хв	Співвідношення кількості ДТП із затором і без нього	Співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього	Середня помилка спостереження, %
1	3	1,191	1,08	9,32
2	6	1,299	1,15	11,5
3	10	1,34	1,22	8,96
4	12	1,299	1,25	3,77
5	15	1,34	1,22	8,96
6	19	1,531	1,25	18,4
7	4	1,021	1,04	1,86
8	6	1,021	1,07	4,8
9	10	1,191	1,13	5,12
10	13	1,021	1,08	5,78
11	15	1,299	1,12	13,8
12	18	1,34	1,15	14,2
13	3	0,975	1,02	4,62
14	5	1,021	1,05	2,84
15	8	0,975	1,11	13,8
16	11	1,429	1,12	21,6
17	15	1,34	1,14	14,9
18	16	1,299	1,21	6,85
19	4	1,021	1,05	2,84
20	7	1,021	1,09	6,76
Середня помилка апроксимації, %				9,03

З рис. 9–11 випливає, що зі збільшенням періоду тривалості транспортного затору збільшується і кількість дорожньо-транспортних пригод.

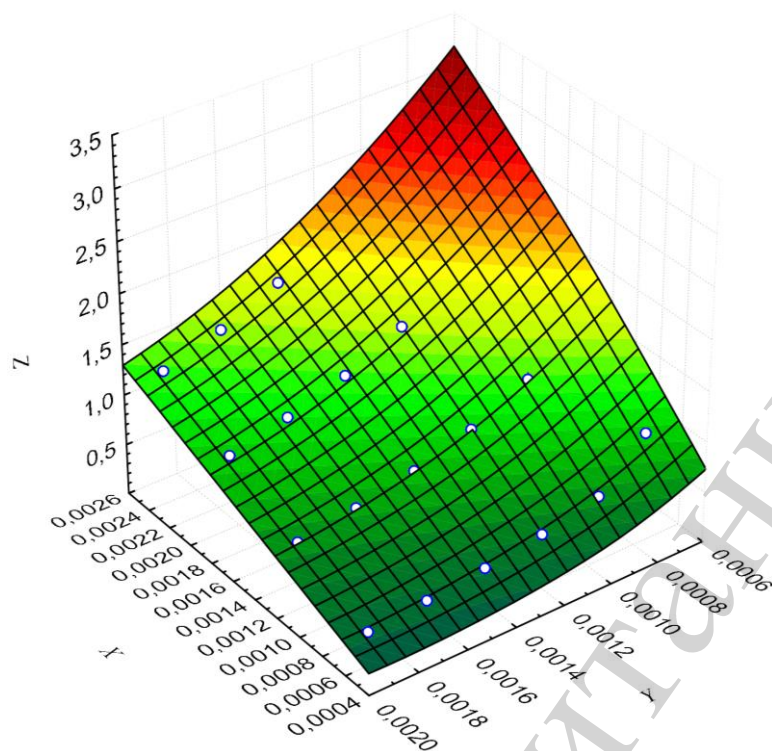


Рис. 9. Залежність співвідношення кількості ДТП протягом року із заторм і без нього (Z) для середньостатистичного водія стосовно трьох із половиною годин залежно від кількості ДТП на ділянках транспортної системи із заторм (X) і без нього (Y)

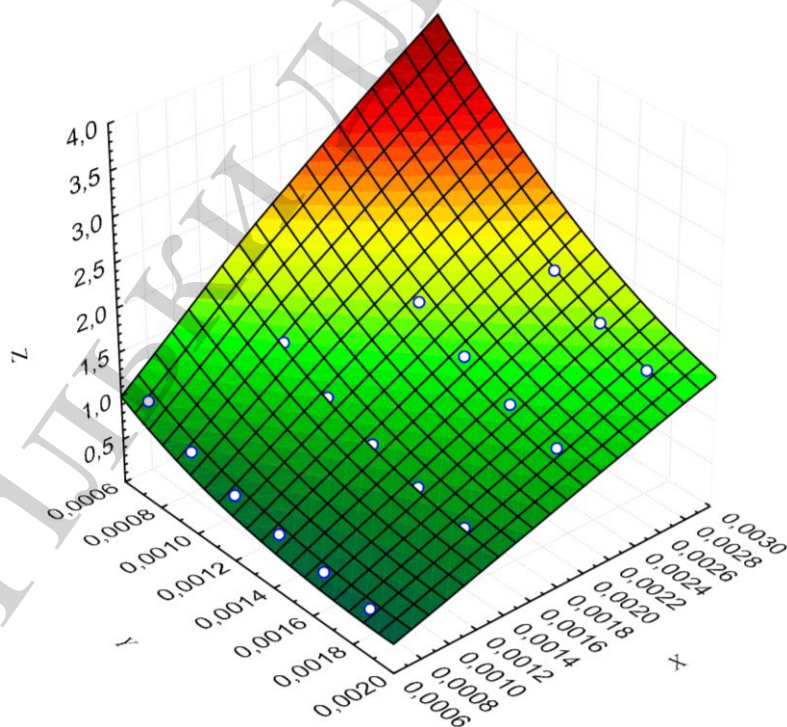


Рис. 10. Залежність співвідношення кількості ДТП протягом року із заторм і без нього (Z) для середньостатистичного водія стосовно чотирьох годин залежно від кількості ДТП на ділянках транспортної системи із заторм (X) і без нього (Y)

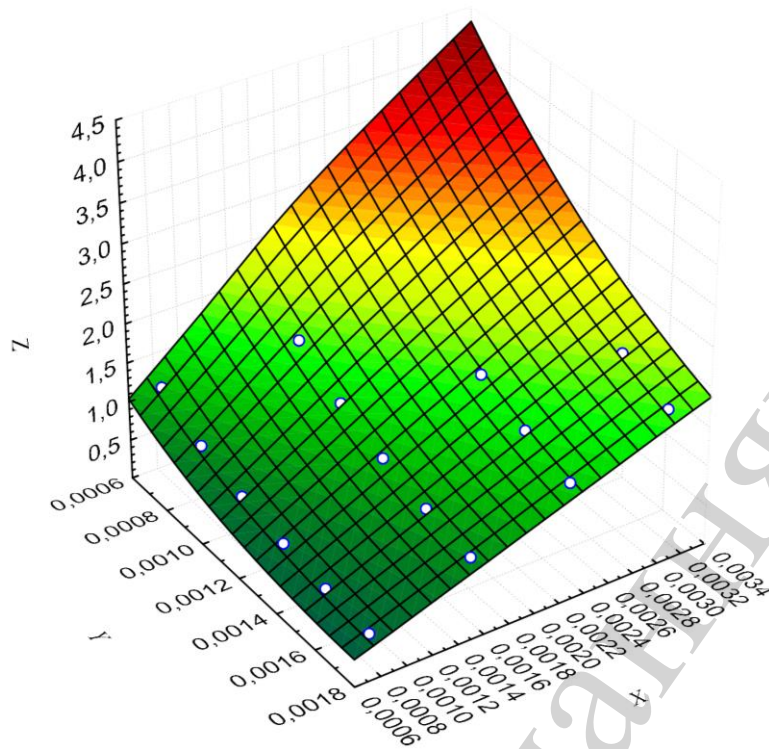


Рис. 11. Залежність співвідношення кількості ДТП протягом року із затором і без нього (Z) для середньостатистичного водія стосовно чотирьох із половиною годин залежно від кількості ДТП на ділянках транспортної системи із затором (X) і без нього (Y)

6. Обговорення результатів дослідження моделі оцінки безвідмовності водія в транспортній системі з урахуванням заторів руху

Основними результатами дослідження є розроблені математичні моделі оцінки безвідмовності середньостатистичного водія на ділянках транспортної мережі (15) і в транспортних вузлах (16). Підсумкова модель (17), яка відображає зміни стану водія внаслідок перебування в заторі, дозволяє оцінити ймовірність скоєння ДТП на елементах транспортної системи після затору. Ці оцінки проведені шляхом визначення співвідношення ймовірностей скоєння ДТП на ділянках транспортної системи в залежності від наявності заторів на них і без нього окремим учасником руху.

Відзначено, що на відміну від існуючих підходів, ймовірність скоєння дорожньо-транспортної пригоди окремо взятого транспортного засобу на ділянці транспортної мережі залежить не лише від параметрів мережі і транспортних потоків – моделі (3), (4). Ця ймовірність залежить також і від змінної в часі реакції водія, яка зі свого боку зростає зі збільшенням рівня його стомлення – моделі (5)–(7).

Основою визначення рівня стомлюваності є аналіз функціонування серцево-судинної системи людини. При цьому аналізується нерівномірність серцевих скорочень, тобто послідовність кардіоінтервалів електрокардіограми, яка є закодованою інформацією про процеси, що протікають в організмі водія – використано при розробці моделі (10).

Такий підхід є принципово новим з точки зору урахування людського фактора при оцінці ймовірності виникнення ДТП на ділянках транспортної мережі і в транспортних вузлах з окремим учасником руху.

Побудовані графіки на рис. 1–8 дозволили виявити закономірності змінювання рівня безвідмовності водія при різній тривалості заторів. При цьому виявлено, що в залежності від значення початкового рівня втоми водія при вході в затор і тривалості затору ймовірність скоєння ДТП на ділянці мережі після затору може зрости від 5 до 40 %.

Проведено оцінку адекватності розроблених моделей, яка полягає в зіставленні значення співвідношення ймовірностей скоєння ДТП на ділянках транспортної системи при наявності затору і без нього і відповідного відношення кількості дорожньо-транспортних пригод (табл. 1–3).

Наведено зміни співвідношень кількості дорожньо-транспортних пригод для середньостатистичного водія на ділянках транспортної системи при наявності заторів різної тривалості, з яких випливає, що зі збільшенням періоду тривалості транспортного затору збільшується і кількість дорожньо-транспортних пригод на ділянках системи (рис. 9–11).

Результати використання розроблених математичних моделей можуть бути уточнені стосовно до конкретного водія при розробці відповідних моделей зміни рівня втоми і часу реакції для кожного типу темпераменту.

Використання підходу щодо оцінювання ймовірності скоєння дорожньо-транспортних пригод на елементах транспортної мережі з урахуванням транспортного затору дає змогу порівняти й оцінити різні варіанти проектних рішень щодо підвищення безпеки дорожнього руху.

Результати роботи можуть бути використані органами міської влади при розробці та коригуванні маршрутів міського пасажирського транспорту для підвищення безпеки дорожнього руху. Також міською владою і транспортними підприємствами при розробці і організації роботи маршрутної системи з тим, щоб для водіїв мінімізувати час знаходження в заторах і тим самим не допускати перевищення рівня втоми і часу реакції. Керівники пасажирських підприємств можуть використовувати результати досліджень для коригування режимів праці та відпочинку для водіїв при роботі на маршрутах шляхом регулювання простоїв на кінцевих пунктах. Також результати досліджень можуть бути використані при професійному відборі і підготовці водіїв відповідними організаціями для розробки рекомендацій з тим, щоб майбутній водій міг враховувати в своїй діяльності отримані закономірності. У різних заторах різної тривалості у нього змінюється стан і час реакції, які впливають на ймовірність скоєння ДТП.

Результати досліджень та розроблені моделі можуть застосовуватися при оцінці безвідмовності водія у випадках появи постійних заторів тривалістю від 3 до 60 хвилин.

Можливим напрямком подальшого розвитку отриманих результатів може бути визначення закономірностей змінювання рівня стомлення водіїв на ділянках транспортної мережі міста після виходу з затору. Також не менш важливими можуть бути дослідження з оцінки ймовірності скоєння дорожньо-

транспортної пригоди водіями на ділянках транспортної мережі з урахуванням темпераменту водія.

7. Висновки

1. В результаті вдосконалення існуючих моделей було визначено ймовірність скоєння дорожньо-транспортної пригоди окремим учасником дорожнього руху на ділянках транспортної мережі з урахуванням затору. Ця ймовірність залежить не тільки від параметрів мережі і транспортних потоків, а насамперед й від змінюваної в часі реакції водія, яка, зі свого боку, прямо пропорційно збільшується залежно від перевищення рівня його стомлення.

2. Розроблено моделі оцінки безвідмовності водія на ділянках транспортної мережі і в транспортних вузлах в залежності від наявності заторів на них. Ці оцінки засновані на підході, що полягає в оцінці співвідношення ймовірностей скоєння ДТП на ділянках транспортної мережі із затором і без нього для середньостатистичного водія. При цьому визначається відношення змінювання його часу реакції внаслідок затору до цих же параметрів в умовах без затору.

3. Виявлено закономірності зміни співвідношень ймовірностей скоєння ДТП для різних умов перебування в заторі водіїв молодшого і старшого віку. Кінцеві значення цих співвідношень в заторі є початковими для оцінки безвідмовності водія на ділянці мережі відразу після затору. При цьому виявлено, що в залежності від умов перебування в заторі і його тривалості відсоток збільшення ймовірності ДТП на ділянках транспортної системи внаслідок затору може досягати від 10 до 50 %.

4. Адекватність розроблених моделей була проведена шляхом співставлення значення співвідношення ймовірностей скоєння ДТП, внаслідок затору, розрахованих за моделлю і без затору і відповідного відношення фактичної кількості дорожньо-транспортних пригод. Середня помилка апроксимації відхилення оцінок співвідношення ймовірностей скоєння ДТП із затором і без нього для середньостатистичного водія дорівнює 9 %.

Література

1. Лобанов, Е. М. (1980). Проектирование дорог и организация движения с учетом психофизиологии водителя. Москва: Транспорт, 311.
2. Гюлев, Н. У., Доля, В. К., Бичев, М. С. (2013). О влиянии изменения функционального состояния водителя на безопасность дорожного движения. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 3 (3 (63)), 67–69. URL: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/14742/12520>
3. Ротенберг, Р. В. (1986). Основы надежности системы водитель – автомобиль – дорога – среда. Москва: Машиностроение, 216.
4. Qi, W., Pei, Y., Song, M., Bie, Y. (2013). Pattern Analysis of Driver's "Pressure-State-Response" in Traffic Congestion. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2013, 1–11. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/853845>
5. Li, F., Yao, X., Jiang, L., Li, Y. (2014). Driving anger in China: Psychometric properties of the Driving Anger Scale (DAS) and its relationship with

aggressive driving. *Personality and Individual Differences*, 68, 130–135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.04.018>

6. Stephens, A. N., Trawley, S. L., Madigan, R., Groeger, J. A. (2012). Drivers Display Anger-Congruent Attention to Potential Traffic Hazards. *Applied Cognitive Psychology*, 27 (2), 178–189. doi: <https://doi.org/10.1002/acp.2894>

7. Arnott, R. (2013). A bathtub model of downtown traffic congestion. *Journal of Urban Economics*, 76, 110–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jue.2013.01.001>

8. Long, K., Lin, Q., Gu, J., Wu, W., Han, L. D. (2018). Exploring Traffic Congestion on Urban Expressways Considering Drivers' Unreasonable Behavior at Merge/Diverge Sections in China. *Sustainability*, 10 (12), 4359. doi: <https://doi.org/10.3390/su10124359>

9. Zhu, J., Dai, Q., Deng, Y., Zhang, A., Zhang, Y., Zhang, S. (2018). Indirect Damage of Urban Flooding: Investigation of Flood-Induced Traffic Congestion Using Dynamic Modeling. *Water*, 10 (5), 622. doi: <https://doi.org/10.3390/w10050622>

10. Mfinanga, D., Fungo, E. (2013). Impact of Incidents on Traffic Congestion in Dar es Salaam City. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2 (2), 95–108. doi: <https://doi.org/10.1260/2046-0430.2.2.95>

11. Гюлев, Н. У. (2011). Влияние времени простоя автомобиля в дорожном заторе на функциональное состояние водителя. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 1 (10 (49)), 50–52. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2465/2266>

12. Ito, T., Kaneyasu, R. (2017). Predicting traffic congestion using driver behavior. *Procedia Computer Science*, 112, 1288–1297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.090>

13. Chin, S.-M., Hu, P. S., Davidson, D. (2011). Making the Traffic Operations Case for Congestion Pricing: Operational Impacts of Congestion Pricing. doi: <https://doi.org/10.2172/1048704>

14. Gyulyev, N., Lobashov, O., Prasolenko, O., Burko, D. (2018). Research of Changing the Driver's Reaction Time in the Traffic Jam. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 308. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19811>

15. Bitkina, O. V., Kim, J., Park, J., Park, J., Kim, H. K. (2019). Identifying Traffic Context Using Driving Stress: A Longitudinal Preliminary Case Study. *Sensors*, 19 (9), 2152. doi: <https://doi.org/10.3390/s19092152>

16. Gyulyev, N., Lobashov, O., Prasolenko, O., Bugayov, I. (2019). Modeling the effect of traffic jam on driver's level of fatigue. *SHS Web of Conferences*, 67, 04005. doi: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196704005>

17. Nguyen-Phuoc, D. Q., Currie, G., De Gruyter, C., Kim, I., Young, W. (2018). Modelling the net traffic congestion impact of bus operations in Melbourne. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 117, 1–12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.005>

18. Xu, Y., Zhang, D., Chowdhury, A. J. K. (2018). Urban road traffic flow control under incidental congestion as a function of accident duration. *Open Physics*, 16 (1), 1085–1093. doi: <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0129>

19. Prasolenko, O., Burko, D., Tolmachov, I., Gyulyev, N., Galkin, A., Lobashov, O. (2019). Creating safer routing for urban freight transportation. *Transportation Research Procedia*, 39, 417–427. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.044>
20. Gao, J., Davis, G. A. (2017). Using naturalistic driving study data to investigate the impact of driver distraction on driver's brake reaction time in freeway rear-end events in car-following situation. *Journal of Safety Research*, 63, 195–204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.10.012>
21. Gyulyev, N., Dolya, C. (2017). The issue of probability of traffic road accident on the elements of the transport network. *American Journal Of Social Science Research*, 3 (5), 17–24. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/fcc2/e99fc6a2cc4432f18886e2b24f5c5e885c30.pdf?_ga=2.28737204.907443567.1580978969-1908018850.1550590803
22. Olhov, V. S., Lubentsov, A. V. (2017). Choice of reaction time on danger of the driver who operates the car, moving with exceeding of the established restriction on the traverse speed. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, 17, 307–312. doi: <https://doi.org/10.32353/khrife.2017.38>
23. Sheu, J.-B., Wu, H.-J. (2015). Driver perception uncertainty in perceived relative speed and reaction time in car following – A quantum optical flow perspective. *Transportation Research Part B: Methodological*, 80, 257–274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.017>
24. Kim, T., Zhang, H. M. (2011). Interrelations of Reaction Time, Driver Sensitivity, and Time Headway in Congested Traffic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2249 (1), 52–61. doi: <https://doi.org/10.3141/2249-08>
25. Доля, В. К., Енглезі, І. П., Пахно, О. С. (2011). Щодо визначення впливу параметрів транспортних потоків та дорожніх умов на ймовірність виникнення ДТП на ділянках дороги. *Вісник Донецької Академії Автомобільного Транспорту*, 3, 29–33.
26. Гюлев, Н. У., Доля, В. К., Охріменко, О. А. (2015). Дослідження впливу стану водія на час його реакції у транспортному заторі. *Комунальне господарство міст*, 121, 60–64.
27. Гюлев, Н. У., Доля, В. К. (2012). О зависимости времени реакции водителя от изменения его функционального состояния. *Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ»*, 26, 47–50.
28. Митропольский, А. К. (1971). *Техника статистических вычислений*. Москва: Наука, 576.
29. Баевский, Р. М. (1979). *Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии*. Москва: Медицина, 298.